

## К ВЫБОРУ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА, ПИТАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Т. Ю. МОГИЛЕВСКАЯ

Целью настоящей статьи является рассмотрение выбора емкости конденсатора для импульсного генератора, питающего специальный электромагнит, при условии определенного перепада магнитного потока.

### 1. Определение магнитного потока

Часто можно предположить, что магнитная индукция в профилированной части полюсного наконечника электромагнита по мере удаления от центра меняется по закону:

$$B_r = B_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^n, \quad (1)$$

где  $n < 1$ , и, кроме того, что величина индукции в точках окружности заданного радиуса  $r_0$  вдвое меньше среднего значения индукции в плоскости, ограниченной этой окружностью, т. е.

$$B_{cp} = 2 B_0. \quad (2)$$

При этих условиях магнитный поток в воздушном промежутке электромагнита составит

$$\Phi = 2 \pi r_0^2 B_0 + \int_{r_0}^{r_n} 2 \pi r B_r dr, \quad (3)$$

где  $r_n$  — внешний радиус полюсного наконечника.

Подставляя  $B_r$  под знак интеграла, получим:

$$\Phi = 2 \pi r_0^2 B_0 \left[ \frac{1-n}{2-n} + \frac{1}{2-n} \left( \frac{r_n}{r_0} \right)^{2-n} \right]. \quad (4)$$

С учетом коэффициента рассеяния  $\sigma$  величина полного магнитного потока, создаваемого обмоткой электромагнита, должна быть

$$\Phi = 2 \pi r_0^2 B_0 \sigma \left[ \frac{1-n}{2-n} + \frac{1}{2-n} \left( \frac{r_n}{r_0} \right)^{2-n} \right]. \quad (5)$$

### 2. Определение профиля полюсных наконечников

При расчетах профиля полюсных наконечников, необходимого для выполнения указанных выше условий, величина воздушного зазора в точках окружности заданного радиуса  $r_0$  определяется мощностью аппарата и должна быть предварительно вычислена или задана, как и основные раз-

меры магнитной цепи.

Подсчет воздушного зазора на любом другом радиусе в профилированной части полюсов производится из условия:

$$\frac{\delta_r}{\delta_0} = \frac{B_0}{B_r} = \left( \frac{r}{r_0} \right)^n. \quad (6)$$

Отсюда

$$\delta_r = \delta_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^n. \quad (7)$$

После того, как полученный в результате расчета профиль наконечников вычерчен, необходимо проверить, выполняется ли соотношение (2).

Для подсчета  $B_{cp}$  разбиваем кривую  $B = f(r)$ , построенную по уравнению (1), на трубки и подсчитываем магнитный поток внутри каждой из них по формуле:

$$\Phi_n = 2 \pi r_n a_n B_n, \quad (8)$$

где  $r_n$  — средний радиус трубки,  $a_n$  — ее ширина,  $B_n$  — средняя величина индукции внутри трубки.

Очевидно, что

$$B_{cp} = \frac{\Sigma \Phi_n}{\pi r_0^2}. \quad (9)$$

### 3. Определение параметров обмотки электромагнита

Индуктивность обмотки

$$L = \frac{w \Phi_m}{I_m} = \frac{w^2 \Phi_m}{A W}, \quad (10)$$

где  $A W$  — полные необходимые ампервитки, подсчитанные обычным способом.

Сечение провода выбирается по действующему значению тока, которое можно определить как

$$I = \frac{I_m}{K_A} = \frac{A W}{K_A w}, \quad (11)$$

где  $K_A$  — коэффициент амплитуды, зависящий от формы кривой.

Активное сопротивление катушки, без учета поверхностного эффекта,

$$R_k = 4 \rho \frac{l w}{\pi d_{np}^2}, \quad (12)$$

где  $l$  — средняя длина витка.

Если обмотка разделена на две катушки (по одной вокруг каждого полюса),  $b$  — ширина каждой из них, а  $h$  — высота полюса в месте расположения катушек, то число слоев в каждой катушке (без учета изоляции)

$$n = \frac{w d_{np}}{2 h}, \quad b = n d_{np} = \frac{w d_{np}^2}{2 h}$$

и

$$l = \pi (2 r_n + b) = \pi \left( 2 r_n + \frac{w d_{np}^2}{2 h} \right).$$

После подстановки в (12) получаем

$$R_k = 4 \rho w \left( \frac{2 r_n}{d_{np}^2} + \frac{w}{2 h} \right). \quad (13)$$

#### 4. Выбор емкости конденсатора

Рассчитываем апериодический разряд конденсатора на катушку с определенными выше параметрами (фиг. 1).

Напряжение на катушке и разрядный ток получаются равными:

$$u = \frac{U_0}{p_1 - p_2} \left( p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t} \right), \quad (14)$$

$$i = \frac{C U_0 p_1 p_2}{p_1 - p_2} \left( e^{p_1 t} - e^{p_2 t} \right), \quad (15)$$

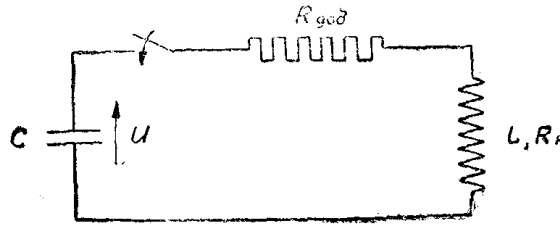
где

$$p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}},$$

$$p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}},$$

$U_0$  — начальное значение напряжения на конденсаторе,  
 $R = R_k + R_{доб}$  подсчитывается из условия:

$$R > 2 \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (16)$$



Фиг. 1

Из условия  $\frac{di}{dt} = 0$ , время нарастания тока до максимума будет

$$\tau_{\phi} = \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (17)$$

Подставляя значения корней  $p_1$  и  $p_2$ , получим:

$$\tau_{\phi} = \frac{1}{2 \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}} \ln \left[ RC \left( \frac{R}{2L} - \frac{1}{RC} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \right) \right]. \quad (18)$$

Это время должно быть не больше четверти периода. Берем предельный случай:

$$\tau_{\phi} = \frac{1}{4} T = \frac{1}{4f}.$$

Тогда соотношение между частотой и параметрами контура получается:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}}{2 \ln \left[ RC \left( \frac{R}{2L} - \frac{1}{RC} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \right) \right]}. \quad (19)$$

Дальнейший расчет ведется следующим образом: задаемся различными значениями  $\omega$ , вычисляем параметры обмотки, а затем для нескольких произвольных значений емкости, подобрав из условия (16) величину  $R$ , подсчитываем  $\ln N$ , где

$$N = RC \left( \frac{R}{2L} - \frac{1}{RC} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \right).$$

Среднее значение

$$(\ln N)_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} (\ln Ni)}{k}.$$

Подставив это значение в уравнение (19), получим:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}}{2(\ln N)_{cp}}.$$

Отсюда величина емкости

$$C = \frac{1}{\frac{R^2}{4L} - 4Lf^2(\ln N)_{cp}^2}. \quad (20)$$

## 5. Пример

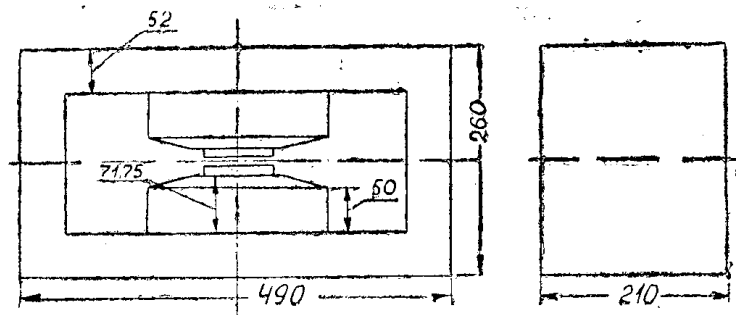
В качестве примера рассмотрим электромагнит, основные размеры которого даны на фиг. 2.

Кроме того, примем  $r_0 = 7,5$  см,  $\delta_0 = 4,6$  см,  $B_0 = 1,25 \cdot 10^{-5}$  вб/см<sup>2</sup>,  $n = 2/3$ ,  $\sigma = 1,6$ .

По уравнению (5) находим

$$\Phi_m = 2\pi \cdot 7,5^2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot 1,6 \left[ \frac{1 - 2/3}{2 - 2/3} + \frac{1}{2 - 2/3} \left( \frac{10}{7,5} \right)^{2 - 2/3} \right] = 9,72 \cdot 10^{-3} \text{ вб}.$$

Расчет профиля полюсных наконечников удобнее вести в форме таблицы, используя при этом имеющиеся размеры электромагнита. В табл. 1



Фиг. 2

и 2 приведены соответственно расчет величины воздушного зазора и индукции на различных радиусах и подсчет потока внутри элементарных трубок.

Таблица 1

$r$ см	$\frac{r_0}{r}$	$\left(\frac{r_0}{r}\right)^{2/3}$	$B_r$ $10^{-8}$ вб/см	$\delta$ см	Примечания
0			4600	1,25	Величина индукции на радиусе $r=4$ см получена при построении кривой $B=f(r)$ , фиг. 3. На этой же фигуре на основании размеров воздушного зазора вычерчен профиль полюсных наконечников.
3			4600	1,25	
4			4400	1,25	
5	1,5	1,31	1640	3,5	
6	1,25	1,16	1450	3,96	
7	1,07	1,05	1310	4,38	
7,5	1,0	1,0	1250	4,6	
8	0,936	0,957	1195	4,8	
9	0,833	0,885	1105	5,2	
10	0,75	0,833	1040	5,55	

Кривую  $B=f(r)$  разбиваем на трубки, как показано на фиг. 3, и подсчитываем величину магнитного потока внутри каждой трубки.

Таблица 2

№№ трубок	$a$ см	$r$ см	$B$ $10^{-8}$ вб/см <sup>2</sup>	$\Phi$ $10^{-8}$ вб
1	3,5	1,75	4600	177500
2	0,5	3,75	4525	53300
3	0,6	4,3	2900	47000
4	0,4	4,8	1750	21150
5	1,0	5,5	1550	53500
6	1,0	6,5	1400	57100
7	0,5	7,25	1275	29050

Из табл. 2 полный магнитный поток внутри окружности радиуса  $r_0$

$$\sum_{n=1}^7 \Phi_n = 4,386 \cdot 10^{-3} \text{ вб},$$

$$B_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^7 \Phi_n}{\pi r_0^2} = \frac{4,386 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 7,5^2} = 2,48 \cdot 10^{-5} \text{ вб/см}^2,$$

$$2 B_0 = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ вб/см}^2.$$

Получившуюся разницу можно отнести за счет неточности построения. Профиль наконечников вычерчен достаточно правильно.

Полные необходимые ампервитки, взятые с некоторым запасом,

$$AW = 5500.$$

Индуктивность обмотки

$$L = \frac{\omega^2 \Phi_m}{AW} = \frac{\omega^2 \cdot 9,72 \cdot 10^{-3}}{5500} = 1,77 \cdot 10^{-6} \omega^2 \text{ гн}.$$

Коэффициент амплитуды для полученной формы кривой разрядного тока принимаем  $K_A = 5$ . Проведенная впоследствии проверка подтвердила правильность этого выбора. Действующее значение тока получается

$$I = \frac{AW}{K_A \cdot \omega} = \frac{1100}{\omega} \text{ а}.$$

Высота полюса в месте расположения катушек  $h = 5$  см,  $r_n = 10$  см, Для меди  $\rho = 0,0175 \cdot 10^{-4}$  ом. см.

Подставляя эти величины в (12), получим

$$R = 0,07 \cdot 10^{-5} w \left( \frac{200}{d_{np}^2} + w \right).$$

Подсчет  $(\ln N)_{cp}$ :

$$w = 100.$$

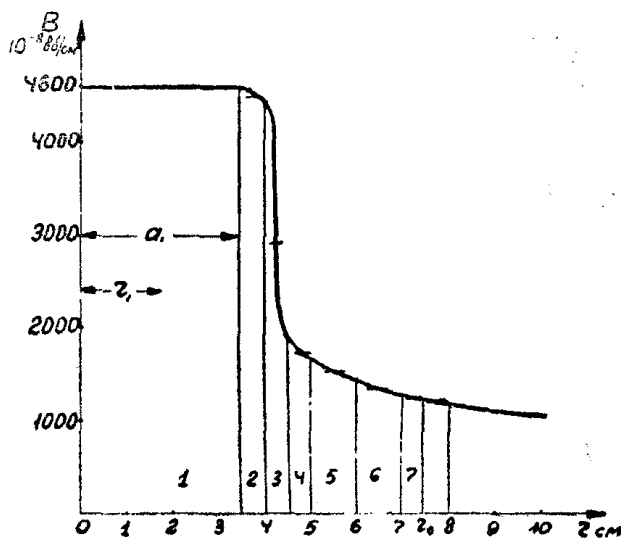
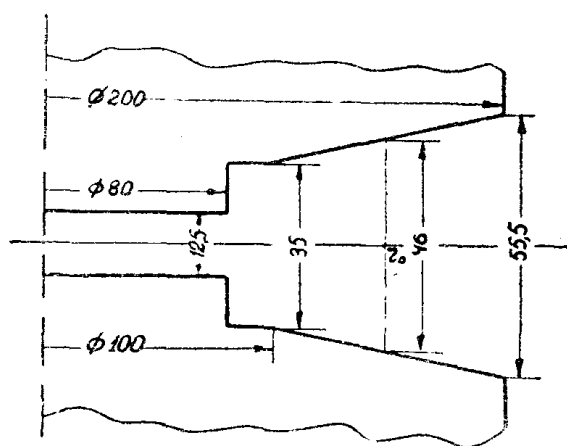
$$I = \frac{1100}{100} = 11 \text{ а.}$$

Сечение изолированного медного провода для этой величины тока  $S_{np} = 1,5 \text{ мм}^2$ .

$$d_{np} = 0,2 \sqrt{\frac{S_{np}}{\pi}} = 0,14 \text{ см.}$$

$$R_k = 0,07 \cdot 10^{-5} \cdot 100 \left( \frac{200}{0,14^2} + 100 \right) = 721 \cdot 10^{-3} \approx 0,72 \text{ ом.}$$

$$L = 1,77 \cdot 10^{-6} \cdot 10^1 = 17,7 \cdot 10^{-8} \text{ гн.}$$



Фиг. 3

Задаемся величиной емкости  $C = 10 \text{ мкф} = 10^{-5} \text{ ф.}$

$$2 \sqrt{\frac{L}{C}} = 84,2$$

Принимаем  $R = 85 \text{ ом}$ , т. е. необходимо добавочное сопротивление  $R_{доб} = 84,28 \text{ ом}$ .

$$N = RC \left[ \frac{R}{2L} - \frac{1}{RC} + \sqrt{\left( \frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC}} \right] =$$

$$= 85 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{85 \cdot 10^3}{2 \cdot 17,7} - \frac{10^5}{85} + \sqrt{\left( \frac{85 \cdot 10^3}{2 \cdot 17,7} \right)^2 - \frac{10^8}{17,7}} \right] = 1,32.$$

$$\ln N = 2,3 \cdot 0,12 = 0,276.$$

Аналогично проводим расчет для других произвольных значений  $w$  и  $C$  и для удобства сводим полученные данные в табл. 3.

Таблица 3

$w$	$l$ $a$	$S_{пр}$ $мм^2$	$d_{пр}$ $см$	$L$ $гн$	$R_k$ $ом$	$C$ $мкф$	$R$ $ом$	$R_{доб}$ $ом$	$N$	$\ln N$
100	11	1,5	0,14	$17,7 \cdot 10^{-3}$	0,72	10	85	24,28	1,32	0,276
						5	120	119,28	1,265	0,235
						1	270	269,28	1,395	0,334
10	110	35	0,64	$17,7 \cdot 10^{-5}$	$0,35 \cdot 10^{-2}$	10	8,5		1,32	0,276
						5	12		1,265	0,235
						1	27		1,395	0,334
4	2,5	120	1,23	$2,83 \cdot 10^{-5}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	10	3,4		1,34	0,295
						5	4,8		1,31	0,272
						1	10,8		1,42	0,347

Среднее значение логарифма

$$(\ln N)_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^9 \ln N_i}{9} = \frac{2,604}{9} = 0,293.$$

Подставляя это значение в (20), получаем выражение емкости в виде:

$$C = \frac{1}{\frac{R^2}{4L} - 4Lf^2 \cdot 0,293^2} = \frac{1}{\frac{R^2}{4L} - 0,344Lf^2}.$$